

研究論文：論文

## スチールロッカー扉閉め音の音質改善に関する研究（第2報）

## 感性量推定式を用いた制振材最適貼付位置の検討

佐藤 真\*, 大森信行\*, 待井 隆\*\*, 富永隆一\*\*, 寺門正顕\*\*\*

\*長野県工業技術総合センター材料技術部門, \*\*光葉スチール株式会社, \*\*\*清泉女学院大学

## Improvement of the Door Closing Sound for Steel Locker (2nd Report)

## Optimal Mounting Position of the Damping Material for Improving the Sound

Makoto SATO\*, Nobuyuki OMORI\*, Takashi MACHII\*\*, Ryuichi TOMINAGA\*\* and Masaaki TERAKADO\*\*\*

\*Nagano Prefecture General Industrial Technology Center, 1-18-1 wakasato, nagano-shi, Nagano 380-0928, Japan

\*\*Koyo Steel Co., Ltd., 4601-1 yawata, chikuma-shi, Nagano 387-0023, Japan

\*\*\*Seisen Jogakuin College, 2-120-8 ueno, nagano-shi, Nagano 381-0085, Japan

**Abstract:** The purpose of this study is to improve door closing sound for the steel locker. In this paper, we examined the optimal mounting position of the damping material on the door for improving the sound. First, we determined several patterns of the damping material mounting position on the door by design of experiment and we recorded these doors closing sound. The presentation sounds for hearing test were selected from these recorded sounds. The hearing tests were performed by using the semantic differential method and the factor analysis. Then we obtained the estimation formula of factor scores by the loudness. Finally, we made graphs of factorial effects by design of experiment. As a result, the damping material which mounted to the center of the door effectively improved the sound.

**Keywords:** Steel locker, Door closing noise, Sound quality, Factor analysis, Damping Material

## 1. はじめに

これまで製品発生音への対策は、とにかく音を抑えることだけに目が向けられており、「音＝悪い」という印象が強くもたれていた。しかし、近年では音を人にとって心地よくする快音化という考え方に次第に目が向けられるようになってきている。その背景には、必要以上の静音化はコスト高につながることや、それによって製品の作動感、存在感などの特徴が失われることで付加価値がなくなってしまうことなどが挙げられる。競合他社の製品との差別化をいかに図るかが問われている中で、製品の特徴は付加価値となりうる重要な要素であり、発生音もその1つに含まれる。実際、ミシン、洗濯機、カメラ、ゴルフクラブといった多くの製品で付加価値向上を図るためのサウンドデザインが行われている[1]。

本研究では、これまでの研究では取り扱われてこなかったスチールロッカーを対象とした。この製品は学校等の多くの人が集まる場所で多く使われ、その扉閉め音は時として使用者や周辺の室にいる者に不快感を生み出し、快適な音環境を乱す原因となっている。製造メーカーとしても音環境に配慮した製品を市場競争力の高い価格で販売したいと考えているが、音環境を優先すると逆にコストが増大してしまうという問題を抱えている。この問題を低コストで解決するには、ただやみくもに対策するのではなく、人の音に対する感覚特性を明

らかにするとともに感覚量に直結する部分に必要な対策を施すことが有効であると筆者らは考えている。

そこで、本研究では扉閉め音を改善するため、必要な感覚量と物理量との関係性を明らかにすることで、効率的な対策方法を見出すとともに、上流設計に感性量を反映させることを目的としている。前回の報告では[2]、SD (Semantic Differential) 法による被験者実験を行い[3]、因子分析結果から扉閉め音の感覚量を取得した。さらにその要因となる物理量との関係性について検討を行った。その結果、高音域 (2kHz以上) への対策が有効であることが判った。

本報告では、扉閉め音の評価特性を前回よりさらに明確化させるため、提示音のサンプル数を増やして2回の被験者実験を行い、因子分析結果を比較した。次に、快音化に有効な制振材貼付位置について検討を行った。2回目の結果から得た因子得点 (感性量) と、提示音を音質評価して得たラウドネス (物理量) から[4]、感性量を推定する重回帰式を導出した。これを用いて感性量を推定し、実験計画法に基づいた要因効果図を作成することで、快音化に有効な貼付位置を特定した。以下にその過程と結果について報告する。

## 2. 実験方法

## 2.1. 被験者実験



図1 供試品（光葉スチール製 ST 型）

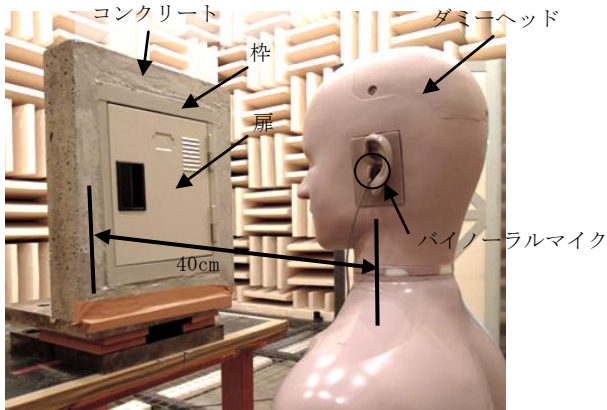


図2 実験の様子

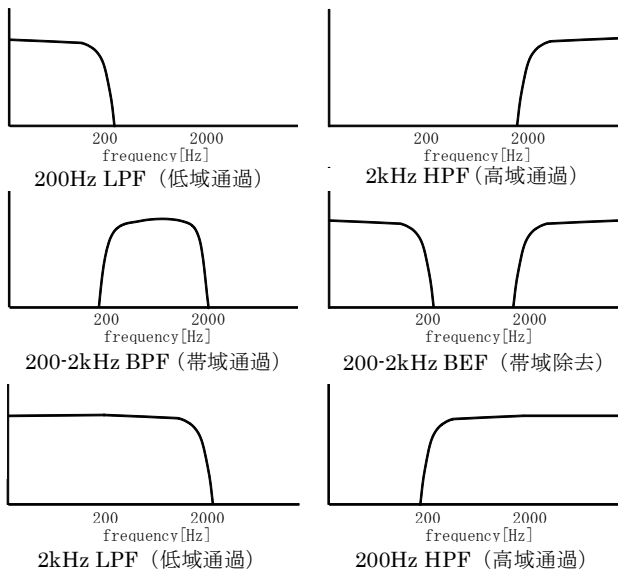


図3 提示音作成用の周波数フィルタ

本報告では被験者実験を2回に分けて行った。1回目では、扉の大きさ、扉閉め速度、音の周波数特性の3つの物理的なパラメータが異なる音について実験を行った。2回目では、制振材を貼付した扉閉め音について実験を行った。

## 2.2. 供試品

実験では3種類のスチールロッカーの扉（光葉スチール製、ST型：小扉 258.6 mm×242 mm，Y型：中扉 387 mm×276 mm，LT

型：大扉 550 mm×270 mm）を使用した。扉部分から発生した音のみを評価の対象とするため、図1のスチールロッカーを加工して扉の枠をコンクリートに埋め込み、そこに扉を取り付けた。

## 2.3. 音の収録

扉閉め音の収録を図2のように全無響室（7m×5.6m×高さ5.5m）内で行った。ダミーヘッド（高研製，SAMRAI）の外耳道入口からスチールロッカーの扉までの距離を0.4mとし、外耳道入口に装着したバイノーラルマイク（Bruel & Kjaer 製，Type3050-A-060）にて扉閉め音を収録した。なお、無響室内の等価騒音レベル（10sec）を騒音計（RION 製，NL-6）で測ったところ 25dB（A）以下であった。

また、扉閉め速度については、取手部の速度をレーザ変位計（松下電工製，LM100）にて測定し、閉め速度が指定の条件（低速：50mm/s，中速：70mm/s，高速：90mm/s）になるよう、筆者のうち1名が扉閉め動作を行い、音の収録を行った。

## 2.4. 提示音の作成

1回目の被験者実験に用いた音源は全27音である。扉閉め速度や扉の大きさによって音の周波数特性が変わることから、3種類の扉を3種類の速度で閉めた音の9音を用いた。さらに、音の評価に対する周波数成分の影響を調べるため、3種類の扉を中速で閉めた音に図3のような6種類の周波数フィルタを適用した音の18音を用いた。これらの音については、最大騒音レベル（A特性）がすべて同じになるようレベル調整した。

2回目の被験者実験に用いた音源は全17音である。小扉に図4の32パターンで制振材を貼付し、それを中速で閉めた音を録音した。その中から特徴的な音13音（No.1, 2, 4, 9, 10, 14, 15, 17, 18, 22, 30, 32）とエリアdの音1音、さらに1回目の音源の中から3種類の扉（大扉，中扉，小扉）を中速で閉めた3音，小扉を中速で閉めた音に2kHzLPFを適用した1音を加えた。

## 2.5. 制振材の貼付位置

制振材（埼玉ゴム工業製，SR-1532N）には厚さ2mmのアスファルト系制振材を使用した。小扉への制振材の貼付位置は図4に示すようにa～fの6箇所のエリアについて検討した。エリア毎の主効果および、エリア間の交互作用を考慮し、実験計画法に基づいてL32直交表に割り付けを行い、32種類の貼付パターンを決定した。なお、制振材は扉の裏面から貼付した。制振材の大きさはNo.17のように1エリアのパターンであれば縦80mm×横75mm，No.16のように隣接するパターンでは、エリア間の境界部分はカットせず、つながった状態のものを貼付した。

## 2.6. 音の再生

事前に収録時の騒音レベルと聴取時の騒音レベルが同じになるよう、再生機器のレベル調整を行った。実験では、提示



tomotive Sound Quality BZ-6047)にて計算した。ラウドネスは臨界帯域毎に時間波形で出力され(臨界帯域:人の聴覚におけるフィルタの周波数帯域、50~13.5kHzの周波数範囲(中心周波数)を24の帯域に分割したもの)、後節では提示音について計算したラウドネス時間波形のピーク値(以下ラウドネスピーク値)を用いている。

### 2.10. 重回帰式に用いた説明変数

図6のように周波数帯域を20 - 63.2 - 200 - 632 - 2k - 6k - 20kHzの6帯域に分割した。この帯域内に含まれる臨界帯域のラウドネスピーク値の平均(以下ラウドネスピーク平均値)を重回帰式の説明変数として用いた。図中のプロット付近の太線がラウドネスピーク平均値である。前回の報告では帯域を3つに分割していたが[2]、その後3帯域では不十分と判断し、今回は3帯域をさらに対数的に2分割する形で周波数帯域を6分割としている。

### 2.11. 信頼性の高い数式モデルの探索

因子得点を目的変数、帯域毎のラウドネスピーク平均値を説明変数として重回帰分析を行った。重回帰分析ではパラメータが多すぎるとオーバーフィッティングや多重共線性の問題が発生し信頼性が低い数式モデルになってしまう。これを回避するために説明変数の絞込みを行った[11]。

まず、オーバーフィッティングを回避するため、AIC(赤池情報量基準)値を用いた。6つの説明変数がすべて使われた数式モデルから説明変数を一つ一つ外していき、その都度数式モデルのAIC値を算出してこれが最小になる数式モデルを選択した。次に、算出された偏回帰係数が意味のあるものかを判断するため有意差検定をし、有意でない説明変数を除外した。最後に多重共線性の問題を回避するためVIF(分散拡大係数)値を計算し、多重共線性が高いVIF>10の説明変数を除外した。

## 3. 結果と考察

### 3.1. 被験者実験の因子分析結果

1回目の被験者実験の評価シートの素点を用いて因子分析(最尤法、プロマックス回転)した結果を表1に示す。各質問項目の因子負荷量のうち最大値を太字で示した。因子数については解釈の可能性[3]を考慮して4因子とした。因子負荷

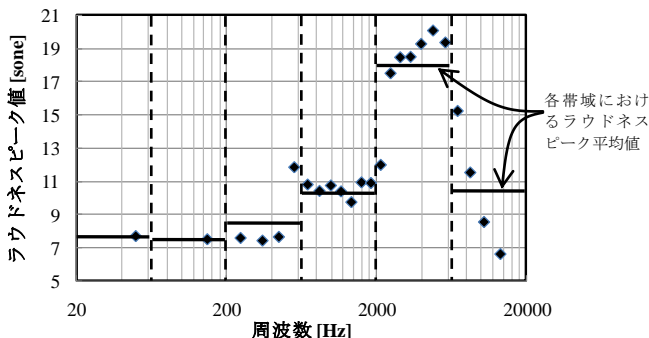


図6 臨界帯域毎のラウドネスピーク値

表1 因子分析結果(1回目)

質問項目	第1因子	第2因子	第3因子	第4因子
17. 悪い - 良い	<b>1.02</b>	0.06	0.06	-0.04
16. 不快な - 心地よい	<b>0.93</b>	-0.06	0.11	0.08
21. 好き - 嫌い	<b>-0.92</b>	0.03	-0.04	0.08
9. 聴きやすい - 耳障りな	<b>-0.68</b>	0.17	0.00	-0.14
19. 上品な - 下品な	<b>-0.62</b>	0.02	0.25	0.04
11. 不安定 - バランスが良い	<b>0.60</b>	0.03	-0.15	-0.06
12. 音程が低い - 音程が高い	-0.05	<b>0.93</b>	-0.10	-0.12
20. 暗い - 明るい	0.20	<b>0.87</b>	-0.12	-0.22
15. 細い - 太い	0.11	<b>-0.81</b>	0.03	-0.14
8. どっしりとした - 軽やか	-0.10	<b>0.8</b>	-0.03	0.11
10. 厚みのある - うすっぺら	-0.06	<b>0.73</b>	0.18	0.07
14. 大胆な - 繊細な	0.27	<b>0.47</b>	-0.12	0.22
18. 迫力がある - 物足りない	0.01	<b>0.38</b>	0.14	0.33
13. 乾いた - 潤いのある	0.27	<b>-0.33</b>	-0.23	-0.03
6. 繊細な - 雑な	-0.03	-0.18	<b>0.88</b>	-0.07
2. 汚い - きれいな	-0.01	0.09	<b>-0.80</b>	0.16
3. 滑らかな - 粗い	-0.04	0.13	<b>0.67</b>	-0.16
7. 安っぽい - 高級な	0.19	-0.21	<b>-0.59</b>	-0.06
1. 大きい - 小さい	-0.07	0.11	-0.30	<b>0.67</b>
4. 静かな - うるさい	-0.11	0.14	0.41	<b>-0.56</b>
5. 響く - 響かない	0.05	-0.12	0.20	<b>0.42</b>

表2 因子間相関(1回目)

	第1因子	第2因子	第3因子	第4因子
第1因子	1.00	-0.50	-0.78	0.18
第2因子	-0.50	1.00	0.45	0.30
第3因子	-0.78	0.45	1.00	-0.07
第4因子	0.18	0.3	-0.07	1.00

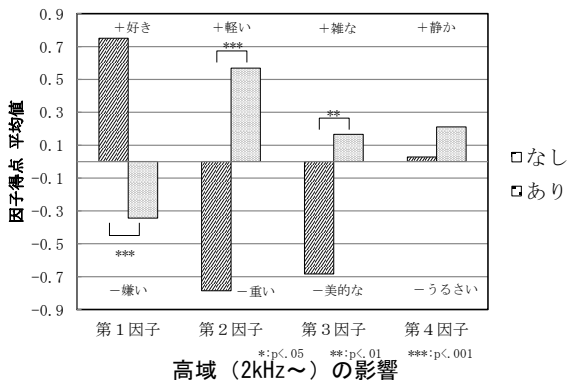
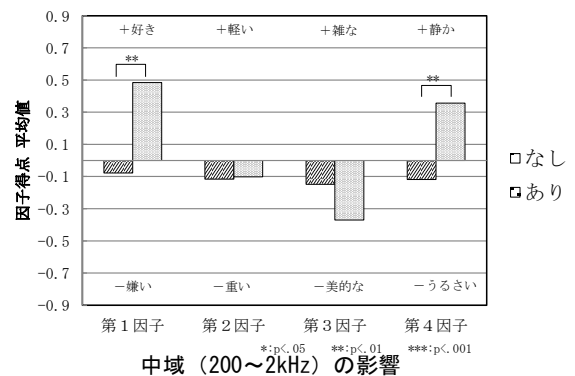
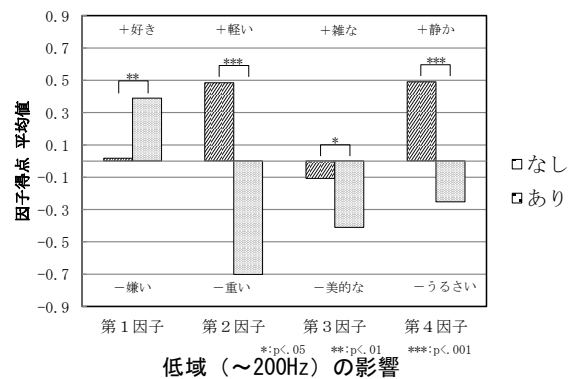


図7 周波数帯域の因子得点への影響

表3 因子分析結果 (2回目)

質問項目	第1因子	第2因子	第3因子	第4因子
17. 悪い - 良い	<b>0.99</b>	0.03	0.02	0.14
16. 不快な - 心地よい	<b>0.92</b>	0.04	0.15	0.13
21. 好き - 嫌い	<b>-0.89</b>	-0.05	-0.03	-0.08
11. 不安定 - バランスが良い	<b>0.71</b>	-0.06	0.09	-0.09
19. 上品な - 下品な	<b>-0.67</b>	0.01	0.05	0.25
9. 聴きやすい - 耳障りな	<b>-0.66</b>	0.01	-0.33	0.04
7. 安っぽい - 高級な	<b>0.51</b>	-0.25	-0.01	-0.37
8. どっしりとした - 軽やか	0.09	<b>0.92</b>	0.12	0.12
10. 厚みのある - うすっぺら	-0.11	<b>0.88</b>	0.18	0.06
12. 音程が低い - 音程が高い	0.00	<b>0.70</b>	-0.33	-0.10
15. 細い - 太い	0.10	<b>-0.64</b>	-0.10	0.10
20. 暗い - 明るい	0.34	<b>0.53</b>	-0.41	-0.05
14. 大胆な - 繊細な	0.39	<b>0.42</b>	0.07	-0.04
13. 乾いた - 潤いのある	0.09	<b>-0.4</b>	0.18	-0.08
1. 大きい - 小さい	0.20	0.14	<b>0.71</b>	-0.09
5. 響く - 響かない	0.15	-0.13	<b>0.66</b>	0.16
4. 静かな - うるさい	-0.33	-0.01	<b>-0.63</b>	0.20
18. 迫力がある - 物足りない	-0.27	0.51	<b>0.54</b>	-0.14
6. 繊細な - 雑な	-0.29	0.05	-0.12	<b>0.66</b>
3. 滑らかな - 粗い	-0.22	0.00	-0.06	<b>0.62</b>
2. 汚い - きれい	0.43	0.03	-0.03	<b>-0.52</b>

表4 因子間相関 (2回目)

	第1因子	第2因子	第3因子	第4因子
第1因子	1.00	0.15	0.33	-0.57
第2因子	0.15	1.00	-0.04	-0.52
第3因子	0.33	-0.04	1.00	-0.18
第4因子	-0.57	-0.52	-0.18	1.00

表5 重回帰分析結果

	偏回帰係数	t値
$\alpha$	2.66***	7.22
$\beta_1$	-0.144***	-5.53
$\beta_2$	-0.184***	-6.59

\*\*\* : p < .001

数式モデル  $y = \beta_1 \times x_1 + \beta_2 \times x_2 + \alpha$

目的変数: y ... 因子得点 (感性量の推定値)

説明変数:  $x_1$  ... 20~63Hz 帯域のラウドネスピーク平均値,

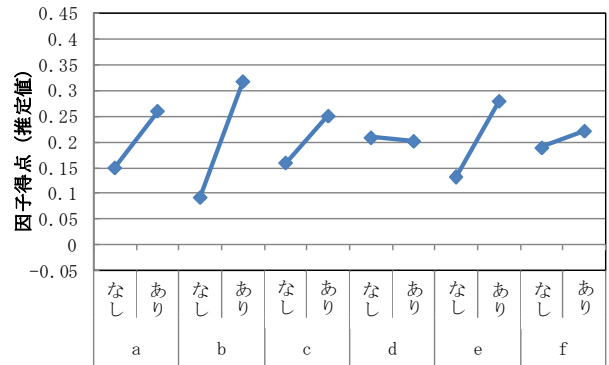
$x_2$  ... 6k~20kHz 帯域のラウドネスピーク平均値

偏回帰係数:  $\alpha, \beta_1, \beta_2$

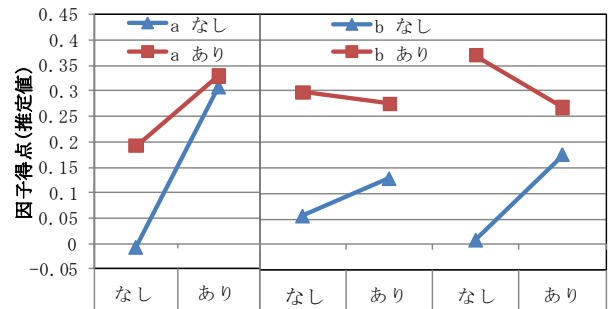
求められた数式

$$y = -0.144 \times x_1 - 0.184 \times x_2 + 2.66$$

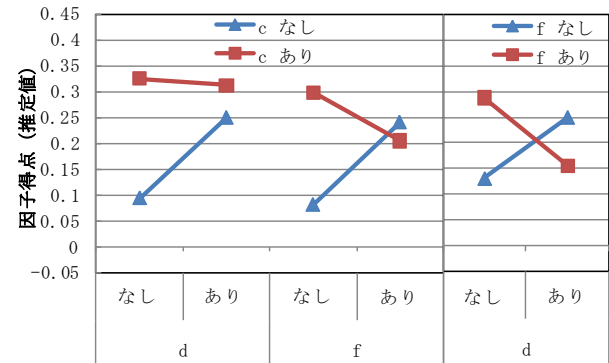
量の第1因子は、「良い」「心地よい」「好き」などに負荷量が高く、好み因子とした。第2因子は「音程が高い」「明るい」「軽やか」などに負荷量が高く、軽さ因子とした。第3因子は「雑な」「汚い」「粗い」などの負荷量が高く、粗さ因子とした。第4因子は「小さい」「静かな」「響かない」に負荷量が高く静かさ因子とした。4つの因子間相関は表2に示した。周波数成分の有無と因子得点の関係を図7に示す。周波数成分の有無の差を確認するため、それぞれ平均値の差の検定を行っており、\*は5%、\*\*は1%、\*\*\*は0.1%の有意水準で平均値に差があることを示している。低域の周波数成分がある場合は「好き」「重い」「美的」「うるさい」の4つの感覚が有意に強くなり、中域の周波数成分がある場合は「好き」「静か」の2つの感覚が有意に強くなる。また、高域の周波数成分がある場合は「嫌い」「軽い」「雑な」の3つの感覚が有意に強くなる傾向が判る。



制振材貼付エリア  
主効果



制振材貼付エリア  
交互作用



制振材貼付エリア  
交互作用

図8 要因効果図

表6 貼付パターンによる因子得点の上位

貼付位置	因子得点 (推定)
bとc	0.444
bとd	0.264
bとe	0.235
bとf	0.236

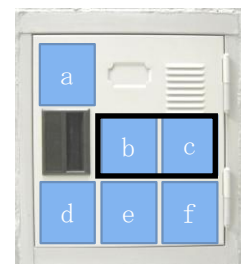


図9 最適貼付位置

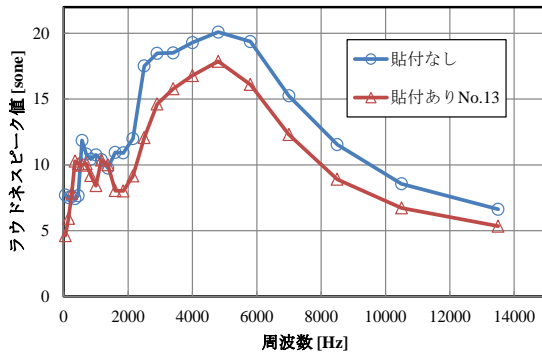


図10 最適貼付位置におけるラウドネスピーク値

次に、2回目の実験の因子分析結果（最尤法，プロマックス回転）を表3に示す。2回目の実験では扉に制振材を貼付した際の扉閉め音を提示音として用いている。1回目の実験と同様に各質問項目の因子負荷量のうち最大値を太字で示した。因子数については解釈の可能性[3]を考慮して4因子とした。1回目の因子分析結果と比較すると第3・第4因子の逆転、項目7、18が別因子へ移動した以外は、因子構造に大きな変化は見られなかった。

### 3.2. 重回帰式

表5に6つの周波数帯域のラウドネスピーク平均値を使って感性量を推定した結果を示す。表1、3より快音化に関係がありそうな形容詞対を見ていくと、第1因子に多く含まれると考えられたため、第1因子の因子得点を推定する感性量とした。63~6kHzの周波数帯域の説明変数は、数式モデルの探索過程の中で推定式から除外された。この推定式を元に、制振材を貼付した32パターンの扉閉め音について第1因子の因子得点の推定を行った。

### 3.3. 最適貼付位置の推定

重回帰式から算出した因子得点の推定値をデータとして用い、実験計画法による図8の要因効果図を作成した。なお、分散分析の結果、有意水準が20%より大きく有意でない項目については誤差項として扱った。また、この線形モデル式より貼付パターンによる第1因子の因子得点（推定値）を算出し、因子得点が上位である4つの貼付パターンを示したのが表6である。これらの結果よりエリアbとエリアcへの制振材の貼付が最も有効であった。制振材が1箇所の場合では、要因効果図の主効果からも明らかのように、エリアbが有効であることが判った。

### 3.4. 最適貼付位置におけるラウドネスピーク値

貼付エリアの有効性を確認するため、貼付位置が最も有効であったエリアbとエリアcの貼付パターン（No.13）と、何も貼付していない場合（No.1）の周波数毎のラウドネスピーク値結果を図10に示す。ラウドネス値[sone]は人が感じる音の大きさを表しており、数値が倍になると倍の感覚として聞こえる。グラフを見ると5kHzを中心に大きなピークがあることから、高域の周波数が大きく聞こえていることが判る。ま

た、制振材の貼付の有無で比較すると、貼付ありの場合にはなし場合に比べて、1.6kHz以上の周波数で平均約3[sone]の減少、割合で約15%減少していることから、高域の周波数については貼らない場合の85%程度の大きさで聞こえていると言える。

### 3.5. 考察

表1の1回目の因子分析結果と表3の2回目の因子分析結果を比較すると、ほぼ同じ因子構造をとっていることから、扉閉め音の評価は、音の種類や被験者によらず同じ指標で評価していると言える。

また、図7の第1因子の因子得点の周波数帯域の有無による影響について低域、中域、高域を比較してみると特に高域の影響が大きく、高域がある方が「嫌い」と評価される傾向があり、これは聴覚の周波数特性において2kHz付近の感度が高いことと深く関係していると考えられる。

表5の重回帰分析結果では、20~63Hzの説明変数の偏回帰係数の符号がマイナスであるので、低域が含まれるほど「嫌い」と評価される傾向になることを示しているが、図7では低域が含まれると「好き」と評価される傾向であり結果が一致していない。原因として、推定式に用いた説明変数の周波数帯域の切り方に問題があった可能性が考えられる。同様に、6k~20kHzの説明変数の偏回帰係数の符号はマイナスであるので、高域が含まれるほど「嫌い」と評価される傾向になることを示しており図7の高域の結果と一致するため、快音の評価（好き嫌い）に高域の周波数が強く影響していると考えられる。

中央付近への制振材の貼付によって、第1因子の因子得点が良くなった要因には、扉閉め動作で発生する曲げ1次振動モード、その弾性変形によって内部に蓄えられるひずみエネルギーが大きく関わっていると考えられる。扉閉め動作を行うと、振動が発生する。この振動における変位によって扉内部にひずみエネルギーが蓄積され、またそれが解放され、また逆方向に変形するといったことが繰り返されることで振動が持続する。扉閉め時には中央を腹とした、変形量が大きき曲げ1次振動が発生するため、中央部に大きなひずみエネルギーが蓄積される。制振材をひずみエネルギーが発生している場所に貼付することで、ひずみエネルギーが熱エネルギーに変換され、振動を持続させるためのエネルギーが消費される。したがって、大きなひずみエネルギーが発生する扉中央に貼付したことで振動や音がより速やかに減少したため、結果として第1因子の因子得点が良くなったのではないかと考えられる。

また、図8の最適貼付位置におけるラウドネスピーク値の結果をみると、高域の周波数で広範囲にわたりラウドネス値の減少が見られたことから、この位置への制振材貼付が有効であったと考えられる。

## 4. おわりに

本研究ではスチールロッカーの扉閉め音についてSD法による評価シートを用いた被験者実験を行い、次のことが判った。

- (1) スチールロッカーの扉閉め音は「好み因子」「軽さ因子」「粗さ因子」「静けさ因子」の4つの因子で評価されていることが判った。
- (2) 快音化につながると考えられる「好み因子」は 2kHz 以上の高域周波数に特に影響を受けやすく、小さい方が好まれる。
- (3) 物理量による感性量の推定式により最適な制振材貼付位置を探索した結果、エリア b, c への貼付が有効であることが判った。

今後は、これらの結果を上流設計に生かせるような、より信頼性の高い推定式および物理量の探索と、推定式の妥当性の検証が今後の課題である。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、実験にご協力をいただきました長野県工業技術総合センター職員各位、清泉女学院大学学生各位、信州大学工学部大谷真准教授に深く感謝の意を表します。

本研究に使用した機器の一部は平成 23 年度に (財) JKA の自転車等機械工業振興事業の補助により導入したものです。

## 参考文献

- [1] 加川幸雄, 戸井武司, 安藤英一, 堤一男: 快音のための騒音・振動制御, 丸善出版, pp.98-109, 2012.
- [2] 佐藤真, 大森信行, 待井隆, 富永隆一, 堀内武志, 小口康明, 寺門正顕: スチールロッカーの扉閉め音の音質改善に関する研究, 第 15 回日本感性工学会大会予稿集, F76, 2013.
- [3] 松尾太加志, 中村知靖: 誰も教えてくれなかった因子分析, 北大路書房, 2008.
- [4] Bruel & Kaer: Automotive Sound Quality BZ-6047 UserManual, pp.243-295, 2007.
- [5] 入門寛, 御法川学, 鈴木昭次, 長松昭男, 近江憲仕, 伊藤孝宏: ターボ機械の音質評価に関する研究 (第 1 報), ターボ機械, 33, 2, pp.7-13, 2004.
- [6] 入門寛, 御法川学, 鈴木昭次, 長松昭男, 磯本剛, 伊藤孝宏: ターボ機械の音質評価に関する研究 (第 2 報), ターボ機械, 33, 4, pp.31-37, 2004.
- [7] 古屋耕平, 高木一晃, 大久保信行, 久松吾郎, 戸井武司: 音質評価指針に基づいたゴルフクラブの構造設計, 日本機械学会論文集 (C 編), 78, 790, pp.71-79, 2012.
- [8] 中川紀壽, 須之内俊也, 関口泰久: 自動車におけるドア閉め音の音質評価 (第 1 報: ドア閉め音の定量的評価手法の検討), 設計工学, 41, 3, pp.46-52, 2006.
- [9] 関口泰久, 須之内俊也, 中川紀壽: 自動車におけるドア閉め音の音質評価 (第 2 報: ドア閉め音の音質目標設定法の検討), 設計工学, 41, 6, pp.47-51, 2006.
- [10] 関口泰久, 須之内俊也, 中川紀壽: 自動車におけるドア閉め音の音質評価 (第 3 報: ボディータイプ別での音質目標設定法の検討), 設計工学, 42, 2, pp.9-15, 2007.
- [11] 緒賀郷志: R による心理・調査データ解析, 東京図書, pp.154-156, 2012.